

# SO SÁNH MỘT SỐ CHỈ TIÊU KỸ THUẬT CỦA BÊ TÔNG ĐẦM LẤN XI LÒ CAO VÀ BÊ TÔNG ĐẦM LẤN TRO TRẤU

Đỗ Thị Kim Trúc<sup>a</sup>, Lâm Ngọc Trà My<sup>b,\*</sup>, Trần Trung Dũng<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh,  
số 35-37 Hồ Hảo Hớn, phường Cầu Ông Lãnh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>b</sup>Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật TP. Hồ Chí Minh,  
số 1 Võ Văn Ngân, phường Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 10/7/2025, Sửa xong 07/10/2025, Chấp nhận đăng 31/10/2025

## Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu tính công tác, cường độ nén và khả năng chịu nhiệt của bê tông đầm lẫn chứa xi lò cao và tro trấu. Xi lò cao và tro trấu là vật liệu thay thế xi măng ở các tỷ lệ 15%, 30% và 45% theo khối lượng. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng tính công tác của bê tông đầm lẫn tăng khi thay thế xi măng bằng xi lò cao, ngược lại tính công tác giảm khi thay thế bằng tro trấu. Cường độ nén của bê tông đầm lẫn xi lò cao ở 7 ngày tuổi thấp hơn cường độ nén của bê tông đầm lẫn đối chứng. Tuy nhiên cường độ nén của tất cả cấp phối bê tông đầm lẫn xi lò cao ở 28 và 90 ngày cao hơn bê tông đầm lẫn đối chứng. Trong khi đó, bê tông đầm lẫn tro trấu có cường độ nén ở 7, 28 ngày tuổi thấp hơn cường độ nén của bê tông đối chứng. Ở 90 ngày, bê tông đầm lẫn chứa 15% tro trấu đạt cường độ nén cao hơn bê tông đầm lẫn đối chứng. Độ ổn định nhiệt của bê tông đầm lẫn xi lò cao và bê tông đầm lẫn tro trấu cao hơn bê tông đầm lẫn xi măng.

*Từ khoá:* bê tông đầm lẫn; cường độ nén; độ mất khối lượng; khả năng chịu nhiệt; tro trấu; xi lò cao.

## PROPERTIES COMPARISON OF ROLLER-COMPACTED CONCRETE WITH GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG AND RICE HUSK ASH

### Abstract

This paper presents a comprehensive study on the workability, compressive strength, and thermal resistance of roller-compacted concrete (RCC) incorporating ground granulated blast-furnace slag (slag-RCC) and rice husk ash (RHA-RCC) as partial cement replacements. Cement was replaced by ground granulated blast-furnace slag and rice husk ash at 15%, 30%, and 45% weight percentages. The results indicate that slag-RCC exhibits improved workability compared to conventional RCC, while RHA-RCC shows reduced workability. Although slag-RCC demonstrated lower compressive strength than the control at 7 days, all slag mixtures surpassed the control in strength at 28 and 90 days. In contrast, RHA-RCC displayed lower compressive strength than the control at both 7 and 28 days; however, the mix containing 15% RHA exceeded the control's strength by day 90. The thermal resistance of slag-RCC and RHA-RCC was higher than that of the control.

*Keywords:* roller-compacted concrete; compressive strength; mass loss; thermal resistance; rice husk ash; ground granulated blast-furnace slag.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(4V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(4V)-08) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Ngày nay việc tái sử dụng các phế thải công nghiệp, nông nghiệp, ví dụ như tro bay, xỉ lò cao, tro trấu để thay thế một phần xi măng trong sản xuất bê tông để giảm thiểu ô nhiễm môi trường đang là một trong những giải pháp hiệu quả để ngành xây dựng phát triển bền vững. Nhiều nghiên cứu khoa học đã chứng minh tính hiệu quả của xỉ lò cao khi thay thế một phần xi măng trong sản xuất bê tông. Oner and Akyuz [1] cho biết bê tông sử dụng xỉ lò cao thay thế một phần xi măng sẽ có cường độ nén ở tuổi sớm (3 hoặc 7 ngày tuổi) thấp hơn cường độ nén của bê tông đối chứng. Sau đó, cường độ nén bê tông tăng khi tăng hàm lượng xỉ lò cao thay thế xi măng và hàm lượng xỉ lò cao tối ưu thay thế xi măng là 55%. Nếu lượng xỉ măng được thay thế bằng xỉ lò cao vượt quá 55%, cường độ nén bê tông không được cải thiện. Tuy nhiên, 30% xi măng được thay thế bằng xỉ lò cao cỡ hạt siêu mịn, với tỷ diện bề mặt 870 m<sup>2</sup>/kg, sẽ làm tăng cường độ nén của bê tông cường độ cao ở 3 ngày từ 12,5% đến 23,5% tùy theo cấp phối [2]. Đồng thời, cường độ chịu uốn của bê tông cường độ cao ở 3 ngày tuổi

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [mylnt@hcmute.edu.vn](mailto:mylnt@hcmute.edu.vn) (My, L. N. T.)

cũng tăng từ 6% đến 56,5% [2]. Bên cạnh đó, Kwon [3] tiết lộ rằng việc sử dụng 30% xi lò cao thay thế xi măng làm giảm phản ứng kiềm cốt liệu trong bê tông cường độ cao. Ngoài ra, các chỉ tiêu thể hiện độ bền của bê tông dùng xi lò cao thay thế một phần xi măng cũng được cải thiện. Yeau và Kim [4] báo cáo rằng khả năng chống ăn mòn cốt thép của bê tông chứa 40% xi lò cao tốt hơn bê tông thông thường. Bê tông tính năng cao chứa xi lò cao có độ hút nước thấp hơn bê tông đối chứng [5]. Độ thấm nước của bê tông đầm lăn chứa 20% hoặc 40% hàm lượng xi lò cao giảm so với mẫu bê tông chuẩn [6]. Khi lượng xi lò cao sử dụng tăng đến 60%, độ thấm nước của bê tông đầm lăn sẽ tăng cao. Chính và Trung [7] cho biết xi lò cao nâng cao khả năng chống xâm thực axit của bê tông. Bê tông cốt liệu tái chế xi lò cao có hiện tượng nứt bề mặt và giảm cường độ nén, cường độ uốn ít hơn bê tông cốt liệu tái chế không có xi lò cao, kết quả từ nghiên cứu của Tung và cs. [8]. Và, Tung và cs. [8] kết luận 40% xi lò cao thay thế xi măng là hàm lượng hiệu quả trong chế tạo bê tông cốt liệu tái chế chịu nhiệt.

Tro trấu, thu được từ việc đốt vỏ trấu trong lò nung ở nhiệt độ từ 500 °C đến 700 °C, có thành phần silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) chiếm 90% [9]. Xu và cs. [10] đã chứng minh với cấu trúc rỗng bao gồm 3 lớp đã làm cho tro trấu có tỷ diện bề mặt lớn, cùng với hoạt tính hóa học rất cao. Tỷ diện bề mặt của tro trấu có thể đạt 50.000  $\text{m}^2/\text{kg}$  với kích thước hạt từ 10 – 75  $\mu\text{m}$  [9]. Ngoài ra, Xu và cs. [11] còn khuyến nghị rằng việc nghiền tro trấu quá mịn cải thiện không nhiều hoạt tính pozzolan của tro trấu vì phá hủy cấu trúc rỗng của tro trấu. Xu và cs. [11] đề xuất sau khi nung, thời gian nghiền tro trấu hiệu quả là 30 phút. Với cấu trúc vô định hình, tỷ diện bề mặt lớn và hoạt tính hóa học cao, tro trấu khi được sử dụng để thay thế một phần xi măng trong sản xuất bê tông đã cải thiện đáng kể các chỉ tiêu cơ học và độ bền của bê tông. Bê tông chứa 20% tro trấu thay thế xi măng đạt cường độ ở 28 ngày tuổi tương đương cường độ bê tông đối chứng [12] và cường độ bê tông cốt liệu tái chế chứa tro trấu vượt cường độ bê tông đối chứng ở 60 ngày tuổi [13]. Độ thấm ion clorua, độ hút nước của bê tông cốt liệu tái chế giảm khi sử dụng tro trấu [14]. Ngoài ra, bê tông cốt sợi thép làm bằng cốt liệu tái chế và tro trấu có khả năng kháng axit cao [15]. Việc cải thiện các chỉ tiêu cơ học và độ bền của bê tông tro trấu là kết quả của các phản ứng pozzolan giữa tro trấu và portlandite tạo ra các khoáng chất C-S-H thứ cấp. Các sản phẩm này không bị hòa tan trong nước, có cấu trúc lỗ rỗng nhỏ đã mang lại độ bền cho bê tông tro trấu [16]. Bên cạnh đó, tro trấu khi thay thế xi măng cũng cải thiện cường độ và độ bền của bê tông tự lèn [17, 18] và bê tông siêu tính năng [18]. Theo báo cáo của Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, năm 2024 Việt Nam đứng thứ 3 thế giới với xuất khẩu gạo. Vỏ trấu, sản phẩm phụ của quá trình sản xuất lúa gạo, chiếm 20 – 25% trọng lượng lúa, ước tính đạt khoảng 10 – 11 triệu tấn thải ra hàng năm ở Việt Nam. Đây sẽ là nguồn nguyên liệu dồi dào để sản xuất tro trấu phục vụ cho ngành công nghiệp bê tông. Tuy nhiên qua quá trình tổng quan tài liệu, tác giả nhận thấy rằng chưa có nhiều công bố nghiên cứu về khả năng chịu nhiệt của bê tông tro trấu. Chỉ có Nazari và Toufigh [19] nghiên cứu khả năng chịu nhiệt của bê tông tro trấu với tỷ lệ tro trấu dao động từ 4% đến 8% và chứng minh rằng bê tông tro trấu có khả năng chịu nhiệt cao hơn bê tông thông thường. Trong khi đó, hàm lượng tro trấu thay thế xi măng tối ưu để cải thiện cường độ bê tông là từ 15% đến 20% [20].

Bê tông đầm lăn là một loại bê tông khô, không có độ sụt, thường được sử dụng để xây dựng mặt đường và đập thủy điện. Bê tông đầm lăn có thành phần nguyên vật liệu tương tự bê tông thông thường. Việc sử dụng các phụ gia khoáng hoạt tính, đặc biệt là tro bay, để thay thế xi măng trong bê tông đầm lăn rất phổ biến. Tuy nhiên việc sử dụng các phụ gia khoáng khác, ví dụ như xi lò cao và tro trấu vẫn chưa được nhiều khoa học quan tâm nghiên cứu. Vì vậy, mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá một số chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông đầm lăn sử dụng hàm lượng xi lò cao và tro trấu ở mức cao, dao động từ 15% đến 45% khối lượng xi măng.

## 2. Nguyên vật liệu và phương pháp thí nghiệm

### 2.1. Nguyên vật liệu

#### a. Chất kết dính

Xi măng poóc lăng Nghi Sơn PC50 (Hình 1(a)), có thành phần hóa học và các chỉ tiêu kỹ thuật thể hiện trong Bảng 1, thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 2682:2020 [21] được sử dụng để chế tạo bê tông đầm lăn.



(a) Xi măng



(b) Xi lò cao



(c) Tro trấu

Hình 1. Xi măng, xi lò cao và tro trấu

Xi lò cao của nhà máy Formosa (Hình 1(b)) có các chỉ tiêu kỹ thuật và thành phần hóa học, liệt kê trong Bảng 1, phù hợp TCVN 11586:2016 [22] được sử dụng để thay thế một phần xi măng trong chế tạo bê tông đầm lăn xi lò cao. Căn cứ vào tỷ diện bề mặt và chỉ số hoạt tính cường độ của xi lò cao thể hiện trong Bảng 1, xi lò cao dùng trong nghiên cứu này được xếp loại S95 theo TCVN 11586:2016 [22].

Bảng 1. Các chỉ tiêu kỹ thuật của xi măng, xi lò cao và tro trấu

| Các chỉ tiêu                                                | Đơn vị tính        | Xi măng | Xi lò cao | Tro trấu   |
|-------------------------------------------------------------|--------------------|---------|-----------|------------|
| <b>(a) Chỉ tiêu cơ lý</b>                                   |                    |         |           |            |
| Khối lượng riêng                                            | g/cm <sup>3</sup>  | 3,05    | 2,88      | 2,05       |
| Cường độ chịu nén                                           | MPa                |         |           |            |
| 3 ngày                                                      |                    | 27,6    | -         | -          |
| 7 ngày                                                      |                    | 34,2    | -         | -          |
| 28 ngày                                                     |                    | 57,2    | -         | -          |
| Thời gian đông kết                                          | phút               |         |           |            |
| Bắt đầu                                                     |                    | 110     | -         | -          |
| Kết thúc                                                    |                    | 170     | -         | -          |
| Độ mịn                                                      |                    |         |           |            |
| Lượng sót trên sàng 0,09 mm, xác định theo phương pháp sàng | %                  | 1       | -         | -          |
| Bề mặt riêng, xác định theo phương pháp Blaine              | cm <sup>2</sup> /g | 3800    | 5260      | 2,740,000* |
| Độ ổn định thể tích, xác định theo phương pháp Le Chatelier | mm                 | 0,2     | -         | -          |

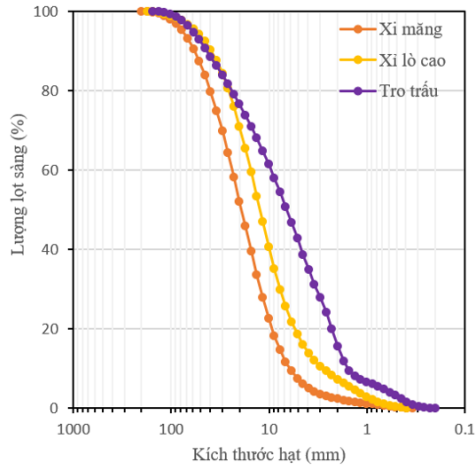
| Các chỉ tiêu                   | Đơn vị tính | Xi măng | Xi lò cao | Tro trấu |
|--------------------------------|-------------|---------|-----------|----------|
| Chỉ số hoạt tính cường độ ở    | %           |         |           |          |
| 7 ngày                         |             | -       | 88,9      | 95       |
| 28 ngày                        |             | -       | 113,5     | -        |
| Hàm lượng mất khi nung         | %           | -       | 0,35      | 2        |
| (b) Thành phần hóa học         | %           |         |           |          |
| CaO                            |             | 63,83   | 38,17     | 0,13     |
| SiO <sub>2</sub>               |             | 20,62   | 40,58     | 95,61    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |             | 4,75    | 11,44     | 0,63     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |             | 3,68    | 0,25      | 0,06     |
| SO <sub>3</sub>                |             | 2,66    | 1,53      | 0,45     |
| MgO                            |             | 1,85    | 5,39      | -        |
| K <sub>2</sub> O               |             | 0,70    | 0,72      | 1,92     |

\*Kết quả nghiên cứu của Salas và cs. [23].

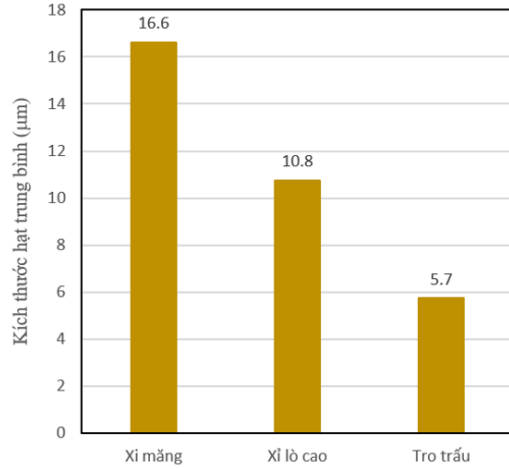
Vỏ trấu có nguồn gốc từ đồng bằng sông Cửu Long được thu thập về phòng thí nghiệm. Sau khi được rửa sạch để loại bỏ tạp chất, vỏ trấu được ngâm trong dung dịch axit clohidric (HCl) nồng độ 1 M trong vòng 24 giờ. Sau 24 giờ, vỏ trấu được vớt ra khỏi dung dịch axit clohidric và rửa sạch nhiều lần để loại bỏ hoàn toàn dung dịch axit. Sau quá trình xử lý bằng dung dịch axit, vỏ trấu sẽ được nung trong lò với tốc độ gia nhiệt 10 độ/phút đến nhiệt độ 600 °C và duy trì mức nhiệt độ 600 °C trong 3 giờ. Salas và cs. [23] đã chứng minh rằng vỏ trấu, sau quá trình xử lý bằng dung dịch axit, được đốt ở nhiệt độ 600 °C trong 3 giờ thỏa mãn các yêu cầu cho vật liệu pozzolan theo ASTM C618 [24]. Bên cạnh đó, Venkatanarayanan and Rangaraju [20] cũng có kết luận tương tự về hoạt tính của pozzolan của tro trấu sau khi nung ở nhiệt độ 600 °C trong 3 giờ. Ngoài ra, Nehdi và cs. [25] cho biết rằng để nâng cao hiệu quả pozzolan kích thước hạt tro trấu cần nhỏ hơn kích cỡ hạt trung bình của xi măng. Vì vậy, trấu sau khi đốt thành tro sẽ được nghiền bằng máy nghiền bi trong vòng 30 phút. Bảng 1 thể hiện thành phần hóa học của tro trấu sau xử lý bằng phương pháp phân tích huỳnh quang tia X (XRF). Hình 2 thể hiện kết quả thí nghiệm kích thước hạt bằng phương pháp laser và Hình 3 là kết quả nhiễu xạ X-ray (XRD) của tro trấu sau xử lý. Kết quả thí nghiệm thành phần hạt cho thấy kích thước hạt trung bình của tro trấu là 5,7 µm, nhỏ hơn kích thước hạt trung bình của xi măng là 16,6 µm. Kết quả thí nghiệm nhiễu xạ X-ray của tro trấu (Hình 3) chứng tỏ tro trấu sau xử lý có cấu trúc vô định hình. Bên cạnh đó, chỉ số hoạt tính cường độ của tro trấu xác định theo TCVN 6016:2011 [26] là 95%. Vì vậy có thể kết luận rằng tro trấu sử dụng trong nghiên cứu này là phụ gia khoáng hoạt tính cao theo TCVN 8827:2011 [27].

#### b. Cốt liệu

Đá dăm và cát sông có nguồn gốc từ mỏ đá cát Tân Đông Hiệp, thành phố Hồ Chí Minh (Hình 4(a)), có chỉ tiêu kỹ thuật trong Bảng 2 phù hợp TCVN 7570:2006 [28], được sử dụng làm cốt liệu. Hình 4(b) thể hiện giới hạn trên và giới hạn dưới thành phần hạt yêu cầu của cốt liệu để chế tạo bê tông đầm lăn theo Hiệp hội bê tông mặt đường Mỹ [29]. Theo Hình 4(b) ta có cốt liệu sử dụng trong nghiên cứu thỏa mãn yêu cầu về thành phần hạt theo TCVN 7570:2006 [28].

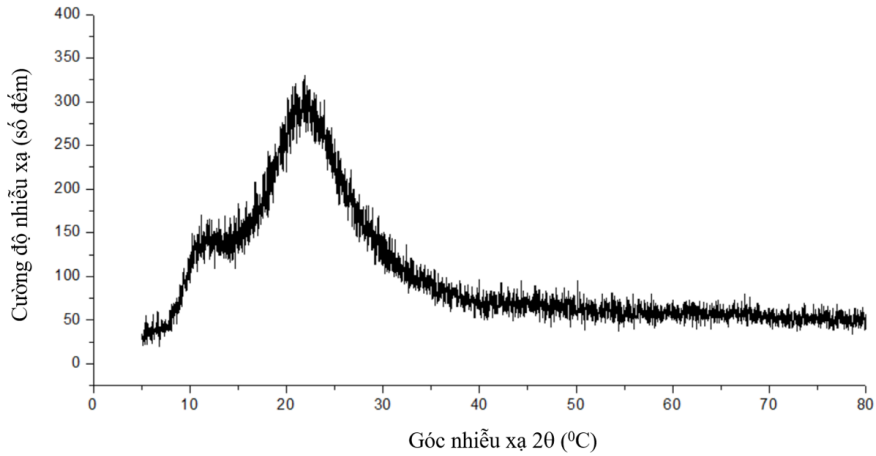


(a) Thành phần hạt



(b) Kích thước hạt trung bình

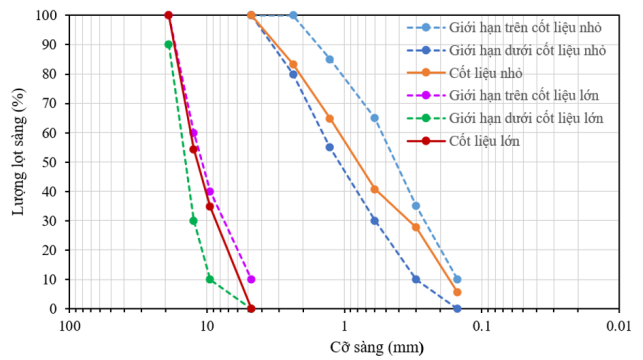
Hình 2. Kích thước hạt của xi măng, xi lò cao và tro trấu



Hình 3. Kết quả phân tích XRD của tro trấu



(a) Cốt liệu



(b) Thành phần hạt của cốt liệu

Hình 4. Cốt liệu và thành phần hạt của cốt liệu

Bảng 2. Chỉ tiêu kỹ thuật của cốt liệu

| Vật liệu | Khối lượng riêng<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Khối lượng thể tích xốp<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Độ hút nước<br>(%) | Mô đun độ lớn | $D_{\max}$ |
|----------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------|---------------|------------|
| Cát sông | 2,65                                     | 1502                                            | 1,2%               | 2,2           | -          |
| Đá dăm   | 2,75                                     | 1447                                            | 0,5%               | -             | 20         |

## 2.2. Cấp phối bê tông đầm lăn

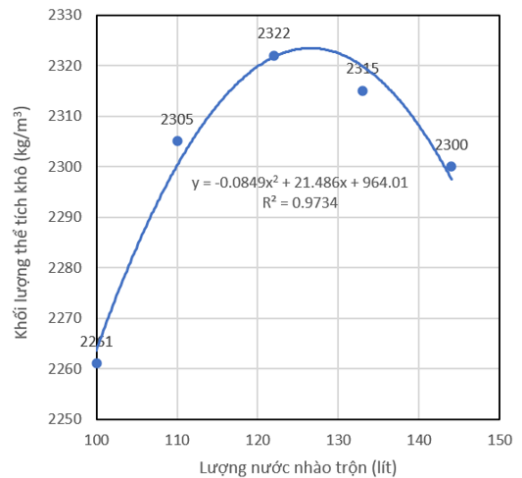
Thành phần cấp phối bê tông đầm lăn được thiết kế theo phụ lục A của tiêu chuẩn TCVN 10403:2015 [30]. Theo TCVN 10403:2015, tỷ lệ chất kết dính và nước được xác định theo công thức (1).

$$R_{90} = AR_{28}^{XM} \left( \frac{CKD}{N} - B \right) \quad (1)$$

trong đó  $R_{90}$  cường độ nén của bê tông đầm lăn yêu cầu ở 90 ngày tuổi (MPa),  $R_{28}^{XM}$  cường độ nén xi măng ở 28 ngày tuổi (MPa),  $CKD/N$  là tỷ số giữa hàm lượng chất kết dính và nước và  $A = 0,811$ ,  $B = 0,581$  là 2 hệ số thực nghiệm lấy theo tiêu chuẩn TCVN 10403:2015.

Với mong muốn cường độ bê tông đầm lăn yêu cầu ở 90 ngày tuổi đạt 55 MPa và xi măng sử dụng là PC50, tỷ lệ chất kết dính và nước tính được ra công thức (1) là 1,937.

Lượng nước tối ưu sử dụng trong 1 m<sup>3</sup> bê tông đầm lăn được xác định thông qua đường cong thể hiện mối quan hệ giữa lượng nước nhào trộn và khối lượng thể tích khô của hỗn hợp bê tông đầm lăn (Hình 5). Phương pháp này rất phổ biến trong thiết kế cấp phối bê tông đầm lăn [31–33]. Để xây dựng đường cong này, hỗn hợp bê tông đầm lăn được nhào trộn với các lượng nước khác nhau, khối lượng thể tích khô tương ứng sẽ được xác định sau khi hỗn hợp bê tông đầm lăn được đầm chặt trong cối Proctor theo ASTM D1557 [34]. Hàm lượng nước khuyến nghị sử dụng theo TCVN 10403:2015 từ 100 lít đến 120 lít cho 1 m<sup>3</sup> bê tông đầm lăn sử dụng cát nghiền và đá dăm có  $D_{\max} = 20$  mm. Vì vậy, năm giá trị lượng nước nhào trộn, cụ thể là 100, 110, 122, 133 và 144 lít, được đề xuất trong nghiên cứu này để xác định lượng nước tối ưu. Bên cạnh đó, tỷ số giữa cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ tối ưu được chứng minh bởi Hashemi và cs. [35] là 1,2. Từ đó, khối lượng cốt liệu sử dụng trong 1 m<sup>3</sup> bê tông đầm lăn đối chứng (kí hiệu CT) được tính toán thể hiện trong Bảng 3. Lượng nước nhào trộn tối ưu xác định theo Hình 5 là 126,5 kg và lượng xi măng sử dụng trong 1 m<sup>3</sup> bê tông đầm lăn đối chứng là 250 kg.



Hình 5. Mối quan hệ giữa lượng nước nhào trộn và khối lượng thể tích khô của bê tông đầm lăn

Bảng 3. Thành phần cấp phối bê tông đầm lăn

| Cấp phối | Nước<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Chất kết dính                     |                                  |                                 | Cốt liệu                         |                                |
|----------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|          |                              | Xi lò cao<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Tro trấu<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Xi măng<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Cát sông<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Đá dăm<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| CT       | 126,5                        | -                                 | -                                | 250                             | 1074                             | 895                            |

| Cấp phối | Nước<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Chất kết dính                     |                                  |                                 | Cốt liệu                         |                                |
|----------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|          |                              | Xi lò cao<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Tro trấu<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Xi măng<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Cát sông<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Đá dăm<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| X15      | 126,5                        | 37,5                              | -                                | 212,5                           | 1074                             | 895                            |
| X30      | 126,5                        | 75                                | -                                | 175                             | 1074                             | 895                            |
| X45      | 126,5                        | 112,5                             | -                                | 137,5                           | 1074                             | 895                            |
| T15      | 126,5                        | -                                 | 37,5                             | 212,5                           | 1074                             | 895                            |
| T30      | 126,5                        | -                                 | 75                               | 175                             | 1074                             | 895                            |
| T45      | 126,5                        | -                                 | 112,5                            | 137,5                           | 1074                             | 895                            |

Bê tông đầm lăn xi lò cao được chế tạo bằng cách thay thế một phần xi măng bằng xi lò cao. Tỷ lệ xi măng thay thế bằng xi lò cao lần lượt là 15%, 30% và 45% theo khối lượng. Tương tự, để chế tạo bê tông đầm lăn tro trấu, xi măng được thay thế bằng tro trấu với các tỷ lệ 15%, 30% và 45% theo khối lượng. Cấp phối của bê tông đầm lăn xi lò cao và bê tông đầm lăn tro trấu được thể hiện trong Bảng 3.

### 2.3. Phương pháp thí nghiệm

#### a. Độ cứng Vebe

Quá trình trộn hỗn hợp bê tông đầm lăn bằng máy trộn cưỡng bức theo quy trình như sau: chất kết dính và cốt liệu được trộn khô trong vòng 2 phút. Sau đó nước được đổ từ từ vào cối trộn và hỗn hợp tiếp tục được trộn trong vòng 3 phút cho đến khi được hỗn hợp đồng nhất. Sau khi nhào trộn, hỗn hợp bê tông đầm lăn được xác định tính công tác bằng nhót kế Vebe theo TCVN 13267:2023 [36].

#### b. Cường độ nén

Các mẫu lập phương kích thước 100 mm được chuẩn bị để thí nghiệm cường độ nén của bê tông đầm lăn. Quy trình chuẩn bị mẫu theo TCVN 3105:2022 [37]. Sau khi đổ khuôn, mẫu được bọc kín bằng ni lông để tránh thoát hơi nước. Mẫu được tháo khuôn sau 24 giờ đúc mẫu và bảo dưỡng trong nước đến ngày thí nghiệm. Cường độ nén được thí nghiệm ở 7, 28 và 90 ngày tuổi theo TCVN 3118:2022 [38].

#### c. Khả năng chịu nhiệt

Sikora và cs. [39] cho biết rằng sự mất cường độ không xảy ra khi vữa xi măng tiếp xúc với nhiệt độ dưới 300 °C. Khi nhiệt độ tiếp xúc trên 300 °C, sự giảm cường độ xảy ra do sự phân hủy các khoáng C-H và C-S-H [40]. Trên 600 °C, các khoáng CaCO<sub>3</sub> bắt đầu phân hủy, đồng thời cốt liệu trương nở, các vết nứt lớn xuất hiện dẫn đến cường độ giảm từ 70% đến 90% [41]. Tuy nhiên, sự giảm cường độ phụ thuộc vào loại xi măng, phụ gia khoáng và cốt liệu sử dụng trong chế tạo bê tông [42]. Vì vậy trong nghiên cứu này, khả năng chịu nhiệt của bê tông đầm lăn xi lò cao và bê tông đầm lăn tro trấu được đánh giá qua sự mất khối lượng và cường độ nén còn lại của mẫu bê tông sau khi tiếp xúc với các mức nhiệt 300 °C, 600 °C và 900 °C trong vòng 3 giờ.

Các mẫu bê tông đầm lăn ở 90 ngày tuổi sẽ được sấy khô ở 100 °C trong vòng 24 giờ. Sau khi sấy, các mẫu được cân khối lượng  $m_1$ . Sau đó, mẫu được cho vào lò nung với tốc độ gia nhiệt là 10 độ/ phút. Thời gian duy trì mức nhiệt chỉ định (300 °C, 600 °C và 900 °C) là 3 giờ. Khi quá trình nung mẫu hoàn tất, mẫu tiếp tục được để trong lò nung 2 ngày, cho đến khi nhiệt độ lò giảm xuống dưới 50 °C. Ngay sau khi lấy ra khỏi lò nung, mẫu được cân khối lượng  $m_2$ . Độ mất khối lượng của mẫu được tính theo công thức (2).

$$ML = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

trong đó ML độ mất khối lượng (%),  $m_1$  khối lượng mẫu trước khi nung (g),  $m_2$  khối lượng mẫu sau khi nung (g).

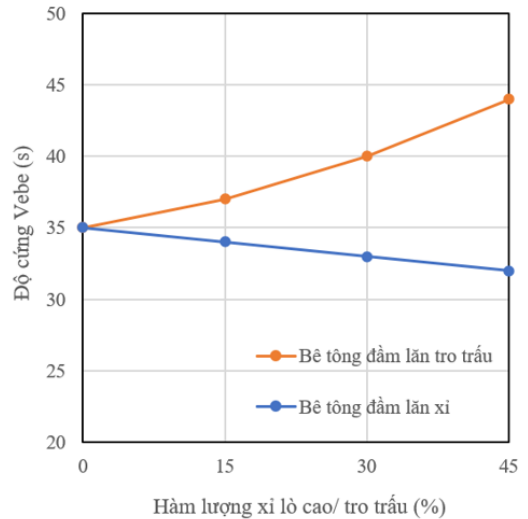
Cường độ nén còn lại của mẫu được xác định sau khi mẫu được lấy ra khỏi lò nung 3 ngày theo TCVN 3118:2022 [38].

Các kết quả thí nghiệm được báo cáo trong nghiên cứu này là giá trị trung bình từ 3 mẫu thí nghiệm.

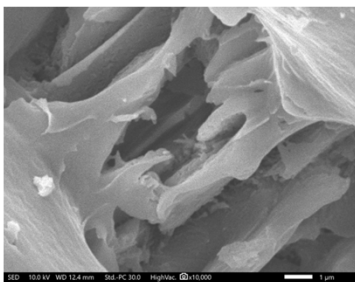
### 3. Kết quả thí nghiệm

#### 3.1. Độ cứng Vebe

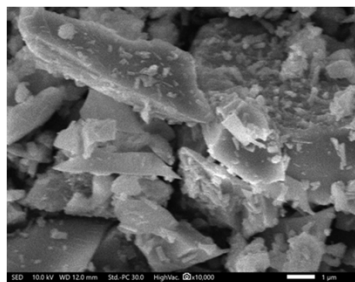
Hình 6 thể hiện độ cứng Vebe của bê tông đầm lẫn xi lò cao và bê tông đầm lẫn tro trấu. Khi thay thế xi măng bằng tro trấu với tỷ lệ 15%, 30% và 45%, độ cứng Vebe của bê tông tăng lên. Cụ thể bê tông đầm lẫn chứa 15%, 30% và 45% tro trấu có độ cứng Vebe lần lượt là 37 s, 40 s và 44 s. Kết quả này cho thấy rằng tính công tác của bê tông giảm khi tăng hàm lượng tro trấu trong bê tông. Endale và cs. [43] và Jain và cs. [44] cũng có kết luận tương tự khi nghiên cứu về tính công tác của bê tông chứa tro trấu. Hiện tượng này có thể do cấu trúc rỗng xốp của tro trấu (Hình 7(a)) dẫn đến việc tro trấu hấp thụ một lượng nước tự do trong bê tông và làm giảm tính công tác. Ngược lại, độ cứng Vebe của bê tông đầm lẫn chứa 15%, 30% và 45% xi lò cao giảm. Nghĩa là tính công tác của bê tông đầm lẫn xi lò cao tăng khi sử dụng xi lò cao thay thế một phần xi măng. Với tỷ lệ 15%, 30% và 45% xi măng được thay thế bằng xi lò cao, độ cứng Vebe của bê tông đầm lẫn giảm nhẹ từ 35 s xuống 34 s, 33 s và 32 s. Lý do bê tông xi lò cao hấp thụ nước ít hơn bê tông thông thường là do đặc điểm bề mặt hạt xi lò cao. Quan sát ảnh chụp từ kính hiển vi điện tử quét (SEM) ta thấy hạt xi lò cao với bề mặt nhẵn, ít xù xì (Hình 7(b)) hơn hạt xi măng (Hình 7(c)).



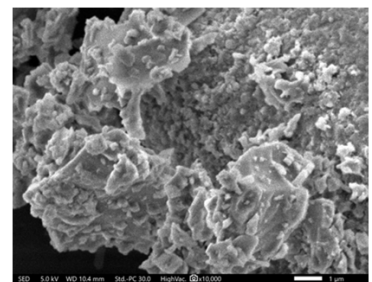
Hình 6. Độ cứng Vebe



(a) Tro trấu



(b) Xi lò cao



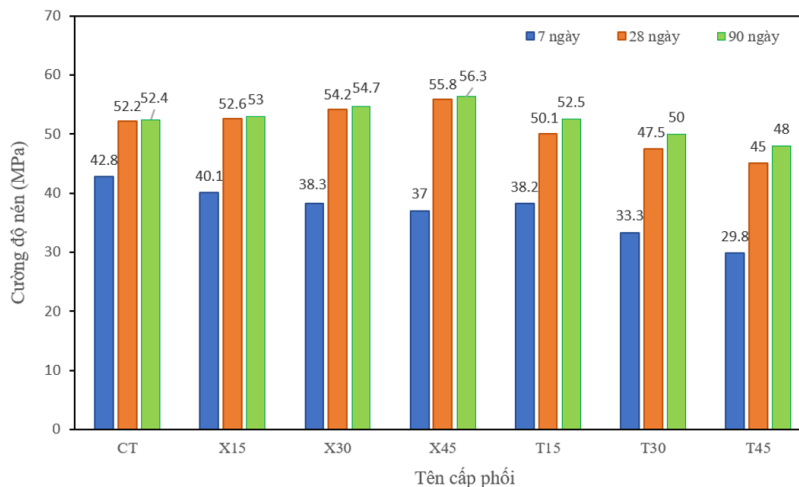
(c) Xi măng

Hình 7. Ảnh SEM hạt tro trấu, xi lò cao và xi măng

#### 3.2. Cường độ nén

Hình 8 thể hiện cường độ nén của các loại bê tông đầm lẫn ở 7, 28 và 90 ngày tuổi. Ở 7 ngày tuổi, cường độ nén của bê tông đầm lẫn đối chứng đạt giá trị lớn nhất so với cường độ nén của bê tông đầm

lần xi lò cao và bê tông đầm lăn tro trấu. Cường độ nén 7 ngày của bê tông đầm lăn đối chứng là 42,8 MPa. Bê tông đầm lăn chứa 15%, 30% và 45% xi lò cao thay thế xi măng có cường độ ở 7 ngày tuổi lần lượt là 40,1 MPa, 38,3 MPa và 37 MPa. So với bê tông đầm lăn đối chứng, khi thay thế 15% xi măng bằng xi lò cao cường độ nén 7 ngày tuổi giảm 6%. Tương tự, khi thay thế 30% và 45% xi măng bằng xi lò cao, cường độ nén của bê tông đầm lăn giảm 11% và 14%. Việc giảm cường độ ở tuổi sớm khi thay thế một phần xi măng bằng xi lò cao cũng được quan sát thấy trong nhiều nghiên cứu đã công bố trước đây [2, 31]. Xi lò cao sở hữu hoạt tính hóa học thấp hơn xi măng vì vậy khi thay thế một phần xi măng bằng xi lò cao sẽ làm giảm cường độ bê tông đầm lăn ở tuổi sớm [45]. Tuy nhiên, Stark và cs. [46] tiết lộ rằng các phản ứng thủy hóa xi măng sẽ được thúc đẩy trong môi trường có xi lò cao. Do đó, cường độ bê tông đầm lăn xi ở 7 ngày tuổi vẫn cao hơn cường độ bê tông đầm lăn tro trấu với cùng mức thay thế xi măng. Cụ thể, cường độ bê tông đầm lăn chứa 15%, 30% và 45% tro trấu ở 7 ngày tuổi lần lượt là 38,2 MPa, 33,3 MPa và 29,8 MPa. Độ giảm cường độ lần lượt là 11%, 22% và 30% khi thay thế 15%, 30% và 45% xi măng bằng tro trấu. Các phản ứng pozzolan giữa tro trấu và các sản phẩm của quá trình thủy hóa xi măng, ví dụ như  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , diễn ra chậm. Do đó, tro trấu chưa có sự đóng góp về cường độ ở 7 ngày tuổi.

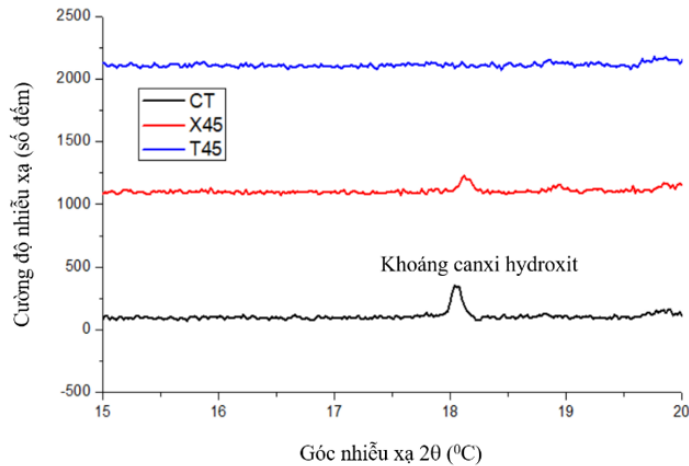


Hình 8. Cường độ nén các loại bê tông đầm lăn ở 7, 28 và 90 ngày tuổi

Ở 28 ngày tuổi, tất cả các cấp phối bê tông đầm lăn xi lò cao (X15, X30, X45) có cường độ cao hơn bê tông đầm lăn đối chứng. Cụ thể, bê tông đầm lăn chứa 15%, 30% và 45% xi lò cao có cường độ ở 28 ngày tuổi lần lượt là 52,6 MPa, 54,2 MPa và 55,8 MPa, trong khi cường độ bê tông đầm lăn đối chứng là 52,2 MPa. Theo Kolani và cs. [47] các khoáng vật chính của các phản ứng thủy hóa xi măng kết hợp xi lò cao là C-S-H, C-S-A-H. Nguyen và cs. [48] tiết lộ rằng các khoáng vật này có tỷ lệ Si/Ca và Al/Si cao hơn các khoáng C-S-H, được tạo ra bởi phản ứng thủy hóa xi măng và có cấu trúc vi mô đồng nhất hơn vì vậy cường độ bê tông đầm lăn xi lò cao hơn cường độ bê tông đầm lăn xi măng. Bên cạnh đó, cường độ nén của tất cả các cấp phối bê tông đầm lăn chứa tro trấu (T15, T30, T45) ở 28 ngày tuổi vẫn nhỏ hơn cường độ bê tông đầm lăn đối chứng, do các phản ứng pozzolan diễn ra chậm. Cường độ nén bê tông đầm lăn ở 28 ngày tuổi chứa 15%, 30% và 45% tro trấu đạt 50,1 MPa, 47,5 MPa và 45 MPa.

Ở 90 ngày tuổi, cường độ bê tông đầm lăn xi lò cao tiếp tục cao hơn cường độ bê tông đầm lăn đối chứng. Bê tông đầm lăn chứa 45% xi lò cao có cường độ cao nhất, đạt giá trị 56,3 MPa, cao hơn 7,5% so với cường độ bê tông đầm lăn đối chứng. Trong khi đó, bê tông đầm lăn chứa 15% tro trấu (T15) có cường độ ở 90 ngày tuổi cao hơn cường độ bê tông đầm lăn đối chứng (CT). Đặc tính pozzolan

của tro trấu đã cải thiện cường độ bê tông đầm lặn ở tuổi muộn. Tuy nhiên, khi tỷ lệ thay thế xi măng bằng tro trấu cao, cụ thể là 30% hoặc 45%, cường độ bê tông đầm lặn tro trấu thấp hơn cường độ bê tông đầm lặn đối chứng. Quan sát Hình 9 thể hiện kết quả nhiễu xạ X-ray (XRD) mẫu bê tông đầm lặn chứa 45% tro trấu (T45) ta thấy khoáng canxi hydroxit (đỉnh ở vị trí 18,10) hoàn toàn bị tiêu thụ bởi tro trấu bằng các phản ứng pozzolan.



Hình 9. Kết quả nhiễu xạ X-ray của CT, X45 và T45 ở 90 ngày tuổi

### 3.3. Khả năng chịu nhiệt

#### a. Độ mất khối lượng

Bảng 4 thể hiện độ mất khối lượng của các mẫu bê tông đầm lặn sau khi tiếp xúc với các mức nhiệt 300 °C, 600 °C và 900 °C trong vòng 3 giờ.

Bảng 4. Độ mất khối lượng (ML, %)

| Cấp phối | Độ mất khối lượng ở các mức nhiệt độ |            |            |                 |                 |
|----------|--------------------------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
|          | 0 - 300 °C                           | 0 - 600 °C | 0 - 900 °C | 300 °C - 600 °C | 600 °C - 900 °C |
| CT       | 3,9%                                 | 5,9%       | 9,4%       | 2,0%            | 3,5%            |
| X15      | 4,2%                                 | 6,2%       | 8,9%       | 2,0%            | 2,6%            |
| X30      | 4,2%                                 | 6,2%       | 8,9%       | 2,0%            | 2,6%            |
| X45      | 4,2%                                 | 6,2%       | 8,9%       | 2,0%            | 2,6%            |
| T15      | 4,1%                                 | 6,0%       | 8,8%       | 1,9%            | 2,8%            |
| T30      | 4,1%                                 | 6,0%       | 8,8%       | 1,9%            | 2,8%            |
| T45      | 4,1%                                 | 6,0%       | 8,8%       | 1,9%            | 2,8%            |

Ở nhiệt độ dưới 300 °C, sự mất nước liên kết trong các khoáng chất (C-S-H, C-A-S-H và các calcium aluminate) của bê tông xảy ra [49]. Kết quả phân tích nhiệt trọng lượng (Thermogravimetric analysis, TG) các mẫu CT, X45 và T45 thể hiện trong Hình 10 cũng khá tương đồng với kết quả ở Bảng 4. Ở mức nhiệt 300 °C, bê tông đầm lặn xi măng mất 3,9% khối lượng. Trong khi đó, bê tông đầm lặn chứa 45% xi lò cao mất 4,2% khối lượng và bê tông đầm lặn chứa 45% tro trấu mất 4,1% khối lượng. Độ mất khối lượng không có sự thay đổi đáng kể giữa các mẫu bê tông đầm lặn chứa 15%, 30% và 45% xi lò cao. Kết quả tương tự cũng được quan sát thấy ở các mẫu bê tông đầm lặn chứa 15%, 30% và 45% tro trấu.

Khi bị nung ở nhiệt độ 600 °C trong 3 giờ, bê tông đầm lăn xi măng, bê tông đầm lăn xi lò cao và bê tông đầm lăn tro trấu có độ mất khối lượng lần lượt là 5,9%, 6,2% và 6,0%. Dựa vào Bảng 4 ta thấy độ giảm khối lượng của bê tông đầm lăn xi măng và bê tông đầm lăn xi lò cao từ mức nhiệt 300 °C đến 600 °C là 2%, trong khi đó của bê tông đầm lăn tro trấu là 1,9%. Song và cs. [50] quan sát thấy thành phần khoáng CaO tăng lên ở mức từ 400 °C đến 500 °C là do sự khử khoáng vật canxi hydroxit. Bê tông đầm lăn tro trấu không chứa khoáng canxi hydroxit (xem Hình 9), do đó độ giảm khối lượng ở mức nhiệt này là nhỏ nhất.

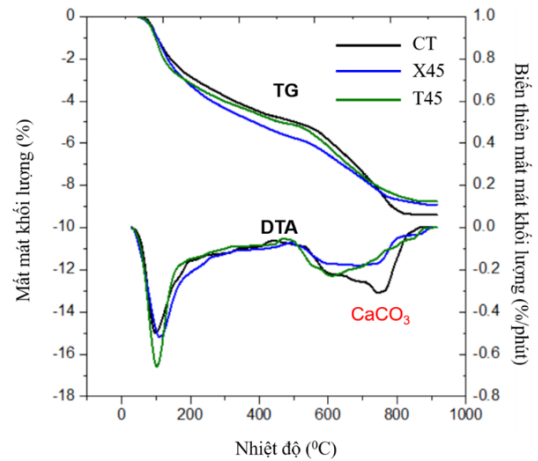
Bê tông đầm lăn xi măng tiếp tục mất khoảng 3,5% khối lượng khi nhiệt độ tăng từ 600 °C lên 900 °C. Sự mất khối lượng của bê tông đầm lăn xi măng ở mức nhiệt này là do sự khử  $\text{CaCO}_3$  xảy ra ở nhiệt độ 756 °C (xem Hình 10). Bê tông đầm lăn xi măng kém bền hơn bê tông đầm lăn xi lò cao và bê tông đầm lăn tro trấu khi bị nung ở nhiệt độ 900 °C, với tổng độ mất khối lượng là 9,4%. Các mẫu bê tông đầm lăn xi lò cao và bê tông đầm lăn tro trấu ổn định nhiệt hơn bê tông đầm lăn chuẩn, với độ mất khối lượng lần lượt là 8,9% và 8,8%.

#### b. Cường độ nén còn lại

Bảng 5 thể hiện cường độ nén còn lại của các cấp phối bê tông đầm lăn sau khi tiếp xúc nhiệt độ cao. Cường độ nén của tất cả các cấp phối bê tông đầm lăn khi bị nung ở 300 °C trong 3 giờ còn lại khoảng 80%. Sau khi bị nung ở 600 °C trong 3 giờ, bề mặt bê tông xuất hiện các vết nứt nhỏ, đồng thời bê tông chuyển sang màu xám đen (xem Hình 11). Lúc này cường độ bê tông đầm lăn ở tất cả các cấp phối còn lại khoảng 57%. Kết quả thí nghiệm tương tự, cụ thể cường độ giảm từ 15% đến 40%

Bảng 5. Cường độ nén còn lại (MPa)

| Cấp<br>phối | Nhiệt độ nung                    |                                                                               |                                  |                                                                                  |                                  |                                                                                  |
|-------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|             | 300 °C                           |                                                                               | 600 °C                           |                                                                                  | 900 °C                           |                                                                                  |
|             | Cường độ<br>nén còn<br>lại (MPa) | Cường độ<br>nén còn lại<br>(% so với cường<br>độ trước sau<br>tiếp xúc nhiệt) | Cường độ<br>nén còn<br>lại (MPa) | Cường độ<br>nén còn lại<br>(% so với<br>cường độ<br>trước sau<br>tiếp xúc nhiệt) | Cường độ<br>nén còn<br>lại (MPa) | Cường độ<br>nén còn lại<br>(% so với<br>cường độ<br>trước sau<br>tiếp xúc nhiệt) |
| CT          | 42,3                             | 80,7                                                                          | 29,8                             | 56,9                                                                             | 4,2                              | 8,0                                                                              |
| X15         | 42,7                             | 80,6                                                                          | 30,1                             | 56,8                                                                             | 5,4                              | 10,2                                                                             |
| X30         | 43,9                             | 80,3                                                                          | 31,2                             | 57,0                                                                             | 5,6                              | 10,2                                                                             |
| X45         | 45,2                             | 80,3                                                                          | 32,1                             | 57,0                                                                             | 5,8                              | 10,3                                                                             |
| T15         | 42,2                             | 80,4                                                                          | 29,9                             | 57,0                                                                             | 5,5                              | 10,5                                                                             |
| T30         | 40,1                             | 80,2                                                                          | 28,4                             | 56,8                                                                             | 5,3                              | 10,6                                                                             |
| T45         | 38,7                             | 80,6                                                                          | 27,3                             | 56,9                                                                             | 5,1                              | 10,6                                                                             |



Hình 10. Kết quả phân tích nhiệt trọng lượng mẫu CT, X45 và T45

được quan sát thấy trong kết quả nghiên cứu của Pachta và cs. [51], Horszczaruk và cs. [52]. Sau khi tiếp xúc nhiệt độ 900 °C trong 3 giờ, toàn bộ bề mặt bê tông xuất hiện các vết nứt lớn (xem Hình 11) và sự liên kết của bê tông gần như bị phá hủy hoàn toàn. Bê tông đầm lẫn xi lò cao và bê tông đầm lẫn tro trấu có sự ổn định nhiệt cao hơn với cường độ nén còn lại khoảng 10% cường độ ban đầu. Trong khi đó, bê tông đầm lẫn đối chứng chỉ còn lại 8% cường độ nén so với cường độ ban đầu. Alani và cs. [53] cũng quan sát thấy kết quả tương tự khi vữa xi măng tiếp xúc với nhiệt độ 900 °C sẽ giảm cường độ trên 80%.



Hình 11. Ảnh các mẫu bê tông sau khi bị nung ở các mức nhiệt độ khác nhau

#### 4. Kết luận

Dựa trên các kết quả thí nghiệm của nghiên cứu, rút ra được các kết luận sau đây:

- Khi thay thế xi măng bằng 15%, 30% và 45% tro trấu, độ cứng Vebe của bê tông đầm lẫn tăng từ 35 s lên 37 s, 40 s và 44 s, tương ứng. Ngược lại, với tỷ lệ 15%, 30% và 45% xi măng được thay thế bằng xi lò cao, độ cứng Vebe của bê tông đầm lẫn giảm nhẹ từ 35 s xuống 34 s, 33 s và 32 s.

- So với bê tông đầm lẫn đối chứng, khi thay thế 15%, 30% và 45% xi măng bằng xi lò cao cường độ nén 7 ngày tuổi giảm 6%, 11% và 14%. Tương tự, độ giảm cường độ lần lượt là 11%, 22% và 30% khi thay thế 15%, 30% và 45% xi măng bằng tro trấu.

- Bê tông đầm lẫn chứa 15%, 30% và 45% xi lò cao có cường độ ở 28 ngày tuổi cao hơn bê tông đầm lẫn đối chứng 0,8%, 3,8%, 6,9%. Trong khi đó, cường độ nén bê tông đầm lẫn ở 28 ngày tuổi chứa 15%, 30% và 45% tro trấu thấp hơn cường độ bê tông đầm lẫn đối chứng lần lượt 4%, 9% và 13,8%.

- Ở 90 ngày tuổi, bê tông đầm lẫn chứa 45% xi lò cao có cường độ cao nhất, cao hơn 7,5% so với cường độ bê tông đầm lẫn đối chứng ở 28 ngày tuổi. Và bê tông đầm lẫn chứa 15% tro trấu có cường độ bằng cường độ bê tông đầm lẫn đối chứng ở 28 ngày tuổi.

- Bê tông đầm lẫn xi măng mất 3,9% khối lượng, bê tông đầm lẫn xi lò cao mất 4,2% khối lượng, bê tông đầm lẫn tro trấu mất 4,1% khối lượng khi tiếp xúc nhiệt độ 300 °C trong 3 giờ. Ở mức nhiệt 600 °C, bê tông đầm lẫn xi măng, bê tông đầm lẫn xi lò cao và bê tông đầm lẫn tro trấu có độ mất khối lượng lần lượt là 5,9%, 6,2% và 6,0%. Các mẫu bê tông đầm lẫn xi lò cao và bê tông đầm lẫn tro trấu ổn định nhiệt hơn bê tông đầm lẫn chuẩn, với độ mất khối lượng lần lượt là 8,9% và 8,8% khi tiếp xúc nhiệt độ 900 °C. Trong khi đó, bê tông đầm lẫn xi măng có độ mất khối lượng là 9,4%.

- Cường độ nén của tất cả các cấp phối bê tông đầm lăn khi bị nung ở 300 °C trong 3 giờ còn lại khoảng 80% và ở 600 °C cường độ còn lại khoảng 57%. Bê tông đầm lăn xi lò cao và bê tông đầm lăn tro trấu có sự ổn định nhiệt cao hơn với cường độ nén còn lại khoảng 10% cường độ ban đầu. Trong khi đó, bê tông đầm lăn đối chứng chỉ còn lại 8% cường độ nén so với cường độ ban đầu.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED); mã số 107.01-2023.06.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Oner, A., Akyuz, S. (2007). [An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete](#). *Cement and Concrete Composites*, 29(6):505–514.
- [2] Teng, S., Lim, T. Y. D., Sabet Divsholi, B. (2013). [Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine Ground Granulated Blast-furnace Slag](#). *Construction and Building Materials*, 40:875–881.
- [3] Kwon, Y.-j. (2005). [A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect](#). *Cement and Concrete Research*, 35(7): 1305–1313.
- [4] Yeau, K. Y., Kim, E. K. (2005). [An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag](#). *Cement and Concrete Research*, 35(7):1391–1399.
- [5] Güneysi, E., Gesoğlu, M. (2008). [A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag](#). *Materials and Structures*, 41(3):479–493.
- [6] Aghaeipour, A., Madhkan, M. (2019). [Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement \(RCCP\) – a review](#). *Road Materials and Pavement Design*, 21(7):1775–1798.
- [7] Chính, N. V., Trung, P. C. T. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chống xâm thực axit của bê tông sử dụng xi lò cao và tro bay](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 15(3V):79–92.
- [8] Tung, T. M., Babalola, O. E., Le, D.-H. (2023). [Experimental investigation of the performance of ground granulated blast furnace slag blended recycled aggregate concrete exposed to elevated temperatures](#). *Cleaner Waste Systems*, 4(December 2022):100069.
- [9] Singh, B. (2018). [Rice husk ash](#). *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, Elsevier, 417–460.
- [10] Xu, W., Lo, T. Y., Memon, S. A. (2012). [Microstructure and reactivity of rich husk ash](#). *Construction and Building Materials*, 29:541–547.
- [11] Xu, W., Lo, Y. T., Ouyang, D., Memon, S. A., Xing, F., Wang, W., Yuan, X. (2015). [Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste](#). *Construction and Building Materials*, 89:90–101.
- [12] Chao-Lung, H., Anh-Tuan, B. L., Chun-Tsun, C. (2011). [Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete](#). *Construction and Building Materials*, 25(9):3768–3772.
- [13] Rattanachu, P., Toolkasikorn, P., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. (2020). [Performance of recycled aggregate concrete with rice husk ash as cement binder](#). *Cement and Concrete Composites*, 108(January):103533.
- [14] Lacerda Gomes, C., Valle Salles, P., César da Silva Bezerra, A., de Souza Rodrigues, C., Spitale Jacques Poggiali, F. (2023). [Mechanical and durability properties of concrete produced with construction and demolition waste and rice husk ash](#). *Construction and Building Materials*, 406(April):133471.
- [15] Koushkbaghi, M., Kazemi, M. J., Mosavi, H., Mohseni, E. (2019). [Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate](#). *Construction and Building Materials*, 202:266–275.
- [16] Lin, Y., Alengaram, U. J., Ibrahim, Z. (2023). [Effect of treated and untreated rice husk ash, palm oil fuel ash, and sugarcane bagasse ash on the mechanical, durability, and microstructure characteristics of blended concrete – A comprehensive review](#). *Journal of Building Engineering*, 78(July):107500.

- [17] Kannur, B., Chore, H. S. (2023). [Low-fines self-consolidating concrete using rice husk ash for road pavement: An environment-friendly and sustainable approach](#). *Construction and Building Materials*, 365 (December 2022):130036.
- [18] Van Tuan, N., Ye, G., van Breugel, K., Fraaij, A. L. A., Bui, D. D. (2011). [The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete](#). *Construction and Building Materials*, 25(4):2030–2035.
- [19] Nazari, A., Toufigh, V. (2024). [Effects of elevated temperatures and re-curing on concrete containing rice husk ash](#). *Construction and Building Materials*, 439(April):137277.
- [20] Kizhakkumodam Venkatanarayanan, H., Rangaraju, P. R. (2015). [Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete](#). *Cement and Concrete Composites*, 55:348–363.
- [21] TCVN 2682:2020 (2020). *Xi măng Poóc lăng*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [22] TCVN 11586:2016 (2016). *Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [23] Salas, A., Delvasto, S., de Gutierrez, R. M., Lange, D. (2009). [Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete](#). *Cement and Concrete Research*, 39(September): 773–778.
- [24] ASTM C618-05 (2005). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken.
- [25] Nehdi, M., Duquette, J., El Damatty, A. (2003). [Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete](#). *Cement and Concrete Research*, 33(8):1203–1210.
- [26] TCVN 6016:2011 (2011). *Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [27] TCVN 8827:2011 (2011). *Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa - Silicafume và tro trấu nghiền mịn*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [28] TCVN 7570:2006 (2006). *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [29] American Concrete Pavement Association (2014). *Roller-Compacted Concrete Pavements as Exposed Wearing Surface*. American Concrete Pavement Association Guide Specification, pp. 1–29.
- [30] TCVN 10403:2015 (2015). *Công trình thủy lợi - Đập bê tông đầm lăn - Thi công và nghiệm thu*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [31] Mardani-Aghabaglou, A., Ramyar, K. (2013). [Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method](#). *Construction and Building Materials*, 38 (1):356–364.
- [32] Chhorn, C., Kim, Y. K., Hong, S. J., Lee, S. W. (2017). [Evaluation on compactability and workability of roller-compacted concrete for pavement](#). *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8):905–910.
- [33] Lam, M. N.-T., Jaritngam, S., Le, D.-H. (2017). [Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties](#). *Construction and Building Materials*, 154(15):482–495.
- [34] ASTM D1557-12 (2015). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*. Journal of Geoscience and Environment Protection, vol. 8, no. 11.
- [35] Hashemi, M., Shafigh, P., Karim, M. R. B., Atis, C. D. (2018). [The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement](#). *Construction and Building Materials*, 169:553–566.
- [36] TCVN 13267:2023 (2023). *Bê tông đầm lăn - Phương pháp xác định độ cứng và khối lượng thể tích bằng bàn rung*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, p. 13267.
- [37] TCVN 3105:2022 (2022). *Hỗn hợp bê tông và bê tông - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [38] TCVN 3118:2022 (2022). *Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, pp. 1–16.
- [39] Sikora, P., Cendrowski, K., Horszczaruk, E., Mijowska, E. (2018). [The effects of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>](#)

- nanoparticles on the mechanical properties of cement mortars exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 182:441–450.
- [40] Saridemir, M., Çiflikli, M., Soysat, F. (2018). Mechanical and microstructural properties of HFRHSCs containing metakaolin subjected to elevated temperatures and freezing-thawing cycles. *Construction and Building Materials*, 158:11–23.
- [41] Georgali, B., Tsakiridis, P. E. (2005). Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. *Cement and Concrete Composites*, 27(2):255–259.
- [42] Kou, S. C., Poon, C. S., Etzeberria, M. (2014). Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 53:73–82.
- [43] Endale, S. A., Taffese, W. Z., Vo, D.-H., Yehualaw, M. D. (2023). Rice Husk Ash in Concrete. *Sustainability*, 15(1):137.
- [44] Jain, V., Jain, B., Sancheti, G. (2021). Influence of Rice Husk Ash (RHA) on the Workability of Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 796(1):012073.
- [45] Gruyaert, E., Robeyst, N., De Belie, N. (2010). Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 102(3):941–951.
- [46] Stark, J., Möser, B., Bellmann, F. (2007). Nucleation and growth of C-S-H phases on mineral admixtures. *Advances in Construction Materials 2007*, Springer Berlin Heidelberg, 531–538.
- [47] Kolani, B., Buffo-lacarrière, L., Sellier, A., Escadeillas, G., Boutillon, L., Linger, L. (2012). Hydration of slag-blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 34(9):1009–1018.
- [48] Nguyen, T. H. Y., Tsuchiya, K., Atarashi, D. (2018). Microstructure and composition of fly ash and ground granulated blast furnace slag cement pastes in 42-month cured samples. *Construction and Building Materials*, 191:114–124.
- [49] Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., Ehrlacher, A. (2005). The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete Research*, 35(3):609–613.
- [50] Song, H., Jeong, Y., Bae, S., Jun, Y., Yoon, S., Eun Oh, J. (2018). A study of thermal decomposition of phases in cementitious systems using HT-XRD and TG. *Construction and Building Materials*, 169: 648–661.
- [51] Pachta, V., Konopisi, S., Stefanidou, M. (2021). The influence of brick dust and crushed brick on the properties of lime-based mortars exposed at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 296:123743.
- [52] Horszczaruk, E., Sikora, P., Cendrowski, K., Mijowska, E. (2017). The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 137:420–431.
- [53] Alani, S., Hassan, M. S., Jaber, A. A., Ali, I. M. (2020). Effects of elevated temperatures on strength and microstructure of mortar containing nano-calcined montmorillonite clay. *Construction and Building Materials*, 263:120895.